

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЖИДКУЮ ФАЗУ КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕГО СЛИТКА

Практика эксплуатации устройств ЭМП [1, 2] показывает, что для каждого металла и сплава необходимо подбирать отдельно режимы электромагнитного воздействия: в частности интенсивность перемешивания, направление поля относительно направления вытягивания слитка, схема включения т. е. порядок чередования фаз по пазам индукционного устройства (120° , 60° , 60° - 60° - 240° - фазные зоны). Проведение экспериментальных исследований влияния режимов в промышленных условиях сопряжено с определенными проблемами как технологически - эксплуатационного характера, так и со значительными материальными затратами. В связи с вышеизложенным возникает необходимость проведения моделирования процессов электромагнитного воздействия на кристаллизующийся металл [3].

На сегодняшний день существует множество моделей процесса кристаллизации с электромагнитным воздействием на жидкую фазу слитка. Современное развитие вычислительной техники и программного обеспечения позволяет рассчитывать тепловые гидродинамические и электромагнитные задачи: как по отдельности, так и в связке. Модели основаны на таких методах расчета, как метод конечных элементов (МКЭ), конечных разностей (МКР), конечных объемов (МКО), теории цепей и т.д. Некоторые из моделей, представляющие определенный интерес будут рассмотрены ниже.

В модели авторов из Уральского федерального университета Сидорова О.Ю. и Сарапулова Ф.Н., изложенной в [4, 5], рассматривается кристаллизация неподвижного слитка в бегущем электромагнитном поле. Производится расчет трех задач: электромагнитного поля, гидродинамического поля и температурного поля. Для расчета использовался метод конечных разностей (МКР) с использованием шахматной сетки, в цилиндрической системе координат. В процессе моделирования приняты следующие положения:

- в динамике рассматривается только изменение температурного поля;
- для каждого поля температур (для заданного момента времени) электромагнитное и гидродинамическое поля являются установившимися;

Результатом совместного расчета является получение картины кристаллизации в динамике и определение локальных скоростей кристаллизации.

В целом модель достаточно полно описывает физические процессы в процессе кристаллизации с электромагнитным воздействием на жидкую фазу слитка, позво-

ляет за разумное вычислительное время с приемлемой точностью получить необходимые результаты. Однако к минусам этой модели можно отнести отсутствие возможности моделирования процесса непрерывного литья.

Автором из Сибирского федерального университета Хацаюком М.Ю. была разработана модель литья в электромагнитный кристаллизатор [6]. В модели производится термогидродинамический расчет, с учетом процесса кристаллизации и свободной поверхности жидкости на основании результатов, полученных при выполнении электромагнитного расчета в осесимметричной 2D постановке. Построение геометрической модели проводилось в ANSYS, расчет термогидродинамических процессов проводился в ANSYS–Fluent (МКО).

В этой модели достаточно точно произведено моделирование турбулентных течений различными методами. Так же к плюсам модели относится учет процесса кристаллизации методом «энтальпия-пористость» и наличие динамического термогидродинамического расчета. Однако модель требует больших вычислительных мощностей [7].

Модель проверена путем сравнения результатов моделирования гидродинамических процессов и процессов формирования свободной поверхности с данными полученными на других моделях, а так же с экспериментальными данными. Которое показало, что ее использование для моделирования процессов литья в электромагнитном поле с учетом свободной поверхности жидкого металла является допустимым [7].

Еще одним автором из Сибирского федерального университета Авдуловым А.А. была разработана математическая модель физических процессов при электромагнитном модифицировании слитка в роторной литейной машине [8]. Первым этапом в представленной модели выполняется расчет процесса кристаллизации расплава, для этого решается термогидродинамическая задача в двумерной постановке. Расчетная область представляет собой поперечное сечение отливаемого слитка и учитывается теплота слитка и кристаллизатора отводящаяся в радиальном направлении. Задача учитывает также свободно конвективные течения, образованные разностью плотностей расплава, а для моделирования процессов кристаллизации и плавления, как и в предыдущей работе, был использован метод «энтальпия – пористость» [9]. Решение системы дифференциальных уравнений в частных производных в расчётной области произведены в ANSYS Fluent, используя МКО.

Математическая модель позволяет определять картину распределения теплового поля и фазового состояния металла для разных моментов времени. Трёхмерная геометрия формируется при помощи специального алгоритма. Расчет электромагнитных процессов производится относительно векторного магнитного потенциала в трёхмерной постановке задачи, в ANSYS Emag.

Расчет гидродинамических течений базируется на уравнениях сохранения массы и движения. Расчетной областью является полученная ранее геометрия жидкой

фазы слитка. В качестве источникового члена уравнений движения при решении задачи магнитной гидродинамики служит сила Лоренца. Для расчета гидродинамических течений использовались две модели турбулентности: $k-\omega$ и LES. Первая модель позволяет получить осреднённые величины течения расплава, что дает общую картину структуры течений расплава жидкой фазе слитка. Вторая модель позволяет получить информацию о влиянии нестационарных эффектов турбулентного течения. Решение системы дифференциальных уравнений в частных производных в расчётной области производится в ANSYS CFX. Достоверность разработанной модели подтверждена в лабораторных условиях.

Особый интерес представляет определение не только формы фронта кристаллизации, а моделирование непосредственного роста кристаллов, а в дальнейшем структуры затвердевающего слитка. Одна из таких моделей разработана ученым из Великобритании А. Као [10]. Модель представляет собой совместное решение задач тепло и массопереноса, магнитного поля, а также механики роста кристаллов. Расчет был сравнен с экспериментом, сравнение показало хорошую сходимость.

В представленном примере моделируется затвердевание части слитка размерами $5 \times 5 \times 0,1$ мм, с электромагнитным воздействием. В модели четко видно образование кристаллов до ветвей третьего порядка, а так же поле скоростей и концентраций.

Данная модель является наиболее интересной из всех рассмотренных из-за наличия связи с формируемой микроструктуры слитка, однако применение ее для вычисления структуры промышленных или даже полупромышленных образцов обладающих гораздо большими размерами потребует следовательно большее вычислительное время. А так же может сопровождаться некоторыми неточностями. Так, например, при интенсивной циркуляции жидкого металла в лунке некоторые из уже образованных кристаллов могут обламываться, тем самым образуя дополнительные центры кристаллизации, в данной же модели обламывание дендритов не учитывается.

Исходя из проделанного литературного обзора были выявлены следующие недостатки существующих моделей:

Расположение относительно индуктора фронта кристаллизации и его форма, в значительной мере, могут влиять как на характер, так и на интенсивность циркуляции расплава в жидкой фазе кристаллизующегося слитка. Однако необходимое для этого решение термодинамической задачи требует больших вычислительных мощностей и может занимать до нескольких суток расчетного времени [7].

Отсюда вытекает актуальная задача разработки модели электромагнитного перемешивания жидкой фазы затвердевающего слитка, со следующими особенностями:

- Модель должна быть достаточно точной (с расчетом фронта кристаллизации);
- Не требовать большой вычислительной мощности;

- А так же обладать возможностью задания скорости движения слитка.

Список использованных источников

1. Специальные способы литья: Справочник /Под ред. Акад. АН УССР В.А. Ефимова. М.: Машиностроение. 1991. 422 с.
2. Герман Э. Непрерывное литье. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы почерной и цветной металлургии, 1961. 814 с.
3. Швыдкий Е. Л. Моделирование процесса непрерывного литья с электромагнитным воздействием на жидкую фазу слитка
4. Сидоров О.Ю. Моделирование затвердевания расплава в электромагнитном кристаллизаторе/ Сидоров О.Ю., Сарапулов Ф.Н., Сокунов Б.А. // Сб.науч.трудов. Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий. АПЭЭТ-2014. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, 2014.
5. Сидоров О.Ю. Динамика теплообмена при затвердевании металлического расплава в бегущем электромагнитном поле/ Сидоров О.Ю., Сарапулов С.Ф., Сокунов Б.А.// Промышленная энергетика, 2015, №7, с. 7 – 12.
6. Хацаюк, М. Ю. Индукционная установка с МГД воздействием на высоколегированные алюминиевые сплавы в процессе их приготовления и разливки: автореферат дис. канд. техн. наук М. Ю. Хацаюка – Екатеринбург: Полиграфический центр Библиотечно-издательского комплекса СФУ, 2013. – 22 с.
7. Хацаюк М. Ю. Математическое моделирование процессов литья и кристаллизации алюминиевых сплавов в электромагнитном поле с учетом свободной поверхности жидкого металла/ Хацаюк М.Ю., Минаков А.В., Первухин М.В.// Сб.науч.трудов. Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий. АПЭЭТ-2014. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, 2014, с. 111 – 115.
8. Авдулов А.А. Электромагнитный модификатор слитка в роторной литейной машине дис. канд. техн. наук А. А. Авдулова – Красноярск: Полиграфический центр Библиотечно-издательского комплекса СФУ, 2015.
9. Voller, V. R. Modeling Solidification Processes / V. R. Voller // Technical report. Mathematical Modeling of Metals Processing Operations Conference, Palm Desert, CA American Metallurgical Society. – 1987.
10. A. Kao. The effects of natural, forced and thermoelectric magnetohydrodynamic convection during the solidification of thin sample alloys/ A. Kao, N. Shevchenko, O. Roshchupinka, S. Eckert, K. Pericleous// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 84, 2015.